

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS DECISIONES SOBRE FERTILIDAD DEL SUELO MEDIANTE EL USO DE MODELOS DINÁMICOS

LUCÍA LONGO¹, D. TOMASINI²

Recibido: 27/04/99

Aceptado: 30/08/99

RESUMEN

Los modelos matemáticos de control óptimo constituyen el aporte más reciente al estudio de las relaciones dinámicas de las variables. En este trabajo se presenta una posible aplicación en el campo de la Economía Agraria. Suponiendo que al productor le importa mantener la fertilidad del suelo a largo plazo para incrementar el valor de la tierra, en el modelo se analiza la combinación -sustitución entre abonos naturales o fertilizantes químicos en el tiempo. Luego se evalúa la incorporación de la siembra directa al sistema. La misma se hizo en función de lo que esta técnica aporta al mejoramiento de las condiciones del suelo teniéndose en cuenta el efecto residual que los nutrientes aplicados en un momento, tienen sobre los periodos subsiguientes. Las conclusiones obtenidas son:

La combinación óptima de insumos será aquella para la cual la Tasa Marginal de sustitución dinámica, iguala a la razón de los valores marginales netos. Con la Siembra Directa, el costo de oportunidad del suelo es mayor en el tiempo por la mejora en su fertilidad. Consecuentemente se registrará un aumento en el valor de la tierra.

La productividad marginal del uso de los fertilizantes (orgánicos y químicos) es mayor en los periodos posteriores ($t+1$) con lo que se reduce en el tiempo el costo del manejo de la fertilidad del terreno.

Palabras clave. Economía de los Recursos Naturales. Control óptimo. Fertilidad del Suelo. Siembra Directa

ECONOMIC ASSESSMENT ON DECISIONS ABOUT FERTILITY THROUGH THE USE OF DYNAMIC MODELS

SUMMARY

Optimal control math models are the most recent contribution to the study on economic variable dynamic relationships. This paper introduces a possible application on the fields of Agricultural Economics. Assuming the producer concerns on keeping the long term soil fertility to increase land value through the model it is analysed the effects of combination – substitution along the time between natural and chemical fertilisers. Afterwards it is analysed the condition of no tillage systems considering the improvement that they promote and the residual effect of applied nutrients on future periods. Conclusions are:

Optimal inputs combination will take place when marginal rate of dynamic substitutions equals the ratio of net marginal values. With no tillage system, the soil opportunity cost increases in time based on fertility improvement and as a consequence an increase in land value will be produced.

Marginal productivity of using fertilisers (organic & chemical) is higher in next periods ($t+1$) allowing in the future reductions of soil fertility management costs.

Key words. Natural Resources economics. Optimal Control. Soil Fertility. No tillage system

¹ Cátedra de Economía General. Departamento de Economía y ² Área de Economía de los Recursos Naturales. Departamento de Economía. Facultad de Agronomía, UBA, Av. San Martín 4453 (1417) Buenos Aires

INTRODUCCIÓN

Los intentos para valorar las relaciones interactivas entre la producción y el ambiente no son satisfactorias desde el punto de vista económico. Se ha comprobado que el método costo-beneficio no alcanza a cubrir los aspectos cualitativos del deterioro ambiental.

En este sentido se presenta otro punto de vista para abordar este problema, el enfoque dinámico de un sistema productivo donde, con la metodología neoclásica y el aporte de los análisis de modelos matemáticos dinámicos, se valoran cuestiones agroecológicas.

Cuando se estudia el proceso productivo agrícola se observa una función de producción cuyos argumentos más importantes son de naturaleza dinámica. En este trabajo se expone una propuesta para contemplar esos elementos cambiantes y valorarlos económicamente dentro de un horizonte de tiempo.

Como se sabe, el factor tierra está sujeto al deterioro, es decir, que no mantiene sus cualidades en el tiempo. Al cambiar la calidad del suelo varía la capacidad de producción agrícola y, por lo tanto, es imposible conservar relaciones de sustitución técnica con ningún otro factor. El suelo debería ser capaz de prestar los mismos servicios en el tiempo. Para que esto sea posible año tras año deberán tomarse las decisiones adecuadas en cuanto a la elección de insumos y manejos que garanticen la óptima fertilidad del terreno.

El objetivo de este trabajo es exponer un modelo simple de decisiones privadas para la selección de insumos que garanticen la óptima fertilidad del suelo, mediante un análisis microeconómico que muestre la combinación-sustitución entre abonos naturales y fertilizantes químicos.

MATERIALES Y METODOS

Se proponen dos etapas: la primera donde se expone para la comprensión de su funcionamiento un modelo de control óptimo para la selección de insumos en el tiempo y su relación con la fertilidad del suelo, y una segunda, donde se aplica el modelo evaluando la incorporación de la Siembra Directa (SD) al sistema.

Presentación y formulación del Modelo

Se supone que la tierra se destina a la producción de un cereal, cuyo crecimiento abarca un horizonte finito de plantamiento T .

El rendimiento agrícola, o producto total, está en función de la fertilidad del suelo, reflejada por el contenido de materia orgánica y nutrientes minerales, tal como se manifiesta en la siguiente expresión, que bien puede representar la forma general de una función de producción cuyos argumentos además de los tradicionales insumos y factores, incluye la fertilidad del suelo y el tiempo:

$$Q = Q(X, U, t)$$

$Q_t = Q_t(X_t, U_t, t)$ es la forma general de un modelo de óptimo dinámico donde intervienen una variable de estado (X) una de control (U) y el tiempo (t). Específicamente:

Q_t : es el rendimiento en t . Esta ecuación no es completa, ya que existen numerosas variables asociadas al rendimiento, destacándose entre ellas las relativas al carbono y al Nitrógeno y en segundo lugar a las precipitaciones (Barberis *et al.*, 1983), o disponibilidad de agua en general, que no son tenidas en cuenta en este modelo.

X_t : es un vector que muestra el estado de fertilidad (materia orgánica x_1 , otros nutrientes x_2 , Fósforo, Nitrógeno, Potasio).

U_t : son insumos: u_1 , abonos orgánicos vegetales y animales, y u_2 abonos químicos. Esta es una variable de gran importancia para el análisis de óptimos dinámicos, ya que su presencia afecta iterativamente el nivel de X_t . Es la llamada variable de «control», una variable de control tiene como característica que está sujeta a una elección discrecional que afecta irremediabilmente el valor de la variable de estado.

RESULTADOS

Dado K_t precio del vector de insumos, y el precio del producto P_t , en cualquier momento, el beneficio puede ser escrito como:

$$\pi_t = P_t Q_t - K_t U_t - C_t Z_t \quad (1)$$

donde C_t es el costo unitario de otros insumos Z además de U_t .

El crecimiento del contenido de materia orgánica y otros nutrientes (N y P) en el suelo en cualquier periodo está representado por una función de crecimiento para cada indicador de fertilidad que aparece en la función de rendimiento Q_{it} :

$$x'_{it} = f_{it}(X_t, U_t, t) \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

es una forma de expresar la derivada con respecto al tiempo dx/dt . En el momento inicial del análisis X , ($X_0 = x^1_0, x^2_0$), tiene valores preestablecidos.

La variable $t=0$ y la función f_t sólo se modificará por las elecciones que se hagan en U

f se define como una función continua en todos sus argumentos, para la cual existe derivada primera para x y para t aunque no necesariamente para U .

Es particularmente importante el efecto residual que los nutrientes aplicados en un momento, tienen sobre los periodos subsiguientes. La aplicación de Fósforo (P) como fertilizante manifiesta efectos en periodos subsiguientes (Berardo *et al.*, 1993). En el caso del N, se manifiestan impactos en el nivel de la fertilidad a largo plazo, a través del incremento del material residual del cultivo y de una mayor acumulación de materia orgánica en el suelo (Glendinning *et al.*, 1991). El uso de una ecuación como (2) permite capturar ese efecto de los nutrientes en futuros rendimientos, para considerarlos en las decisiones actuales sobre óptimo uso de fertilizantes. A largo plazo estas decisiones resultan cruciales.

Suponiendo que el productor maximiza el valor presente de un flujo de beneficios $J(X_0)$ y además el valor de la tierra al final del horizonte de planeamiento $J(X_T)$, el problema de la elección óptima de insumos en un contexto dinámico puede expresarse así:

$$J(X_0) = \text{Max}_{Q,U} \int_0^T e^{-\delta t} [P_t Q_{it}(X, U, t) - K_t U_t - C_t Z_t] dt \quad (3)$$

$$= \text{MAX}_{Q,U} \int_0^T e^{-\delta t} \pi_t dt \quad (4)$$

donde δ es la tasa de descuento del productor siendo $J(X_T)$ el valor de la tierra al final del horizonte T . Este último se supone que está en función de la calidad de la tierra, reflejada por la fertilidad del suelo dada por X_T .

Esto implica que el productor otorgará importancia a mantener la fertilidad del suelo a largo plazo para incrementar al final, el valor de la tierra.

Puede deducirse la importancia de este tipo de análisis para realizar contratos de arrendamiento para discriminar la inversión en fertilidad que hace el productor y la incidencia de la misma en el valor final de la tierra. Tener en cuenta estas consideraciones permitiría renegociar las condiciones de los mismos a lo largo del tiempo.

El productor maximizará:

$$J(X_0) + J(X_T)e^{-\delta T} \quad (5)$$

Sujeto a (2) y al stock inicial de los indicadores de fertilidad del suelo:

$$(6) \quad X(0) = X_0 \text{ y } (x_i, u_i) \geq 0$$

La maximización de (5) sujeto a (2) y a (6) puede ser formulada como un problema de control óptimo (Chiang, 1992). La función hamiltoniana asociada con la ecuación de crecimiento del problema anterior está dada por (Babu *et al.*, 1995):

$$(7) \quad H_t = e^{-\delta \cdot t} \pi_t + \sum_{i=1}^2 \phi_i f^i(X_t, U_t)$$

donde ϕ es una variable auxiliar (costate variable) asociada con la ecuación de cambio del estado de x_i . Esta variable como X y U puede tomar diferentes valores en los diferentes puntos del tiempo. Por lo tanto ϕ_i es una versión corta de $\phi_{i,t}$. Esta variable es el nexo entre la ecuación de cambio y el objetivo a maximizar

Las trayectorias óptimas de X , U , Z , y f deben satisfacer las siguientes condiciones:

$$(8) \quad H_{u1} = e^{-\delta \cdot t} [P_1 Q_1 U_1 - K_1] + \sum_{i=1}^2 \phi_i f^i U_1 = 0$$

$$(9) \quad H_{u2} = e^{-\delta \cdot t} [P_1 Q_1 U_2 - K_2] + \sum_{i=1}^2 \phi_i f^i U_2 = 0$$

$$(10) \quad H_{Z1} = e^{-\delta \cdot t} [P_1 Q_1 Z_1 - C_1] = 0$$

$$(11-12) \quad H_{x_i} = \phi_i^* = e^{-\delta \cdot t} [P_1 Q_{xi}] + \sum_{i=1}^2 \phi_i f^i x_i$$

$$(13) \quad H\phi_i = f^i(X, U, t)$$

$$(14-15) \quad \phi_i(T) = \delta \cdot J[X(T)] / \delta x_i(T)$$

Las condiciones 8-15 son necesarias y suficientes para obtener las soluciones óptimas de insumos de fertilizantes orgánicos y químicos.

Las condiciones 8-9 implican que el nivel óptimo de cualquier fertilizante debería ser elegido de manera tal que el beneficio marginal de su uso $e^{-\delta \cdot t} (P_1 Q_1 u_i - K_i)$ deba ser igual a la eficacia de ese insumo para lograr el aumento de los nutrientes del suelo $\sum \phi_i f_{ui}$, donde ϕ_i representa el valor marginal del nutriente i , en todo momento t .

De acuerdo con las condiciones (11-12) la tasa a la cual el valor marginal de cualquier nutriente i cambia ($-\phi_i^*$) es igual a la suma de los incrementos en los beneficio por su uso y contribución a la mejora de la fertilidad en algún período t ($\sum \phi_i f_{x_i}$).

La condición 13 establece que el cambio en el valor de la función Hamiltoniana obliga a un cambio en el valor marginal del nutriente i , por la ecuación del cambio de stock de ese nutriente x_i .

Las condiciones 14-15 indican que el valor marginal del nutriente i al final del horizonte de planeamiento $\phi_i(T)$ se igualaría a la tasa de cambio en el valor de la tierra T por cambiar en una unidad el nutriente: es el valor marginal de la tierra por unidad de nutrientes. Estas condiciones son conocidas como condiciones transversales.

Estas decisiones en un modelo dinámico derivan de los resultados del análisis estático.

Dados 2 distintos insumos de fertilidad, a través de procesos orgánicos i , y químicos j para (8) y (9)

tenemos: (16)

$$\frac{P_i \delta Q_i / \delta u_i - K_i}{P_i \delta Q / \delta u_j - K_j} = \frac{\sum_i \phi_i \delta f / \delta u_i}{\sum_i \phi_j \delta f / \delta u_j}$$

Se iguala la Tasa Marginal de Sustitución entre i y j con respecto a la función de crecimiento $f(X, U, t)$ (a la derecha) con la razón de los Valores marginales netos de esos dos inputs (a la izquierda de la igualdad).

Esta condición es diferente de los resultados estáticos usuales del análisis de la producción agrícola donde la Tasa Marginal de Sustitución de j por i es igual a P_i/P_j . Esto es así porque en el análisis dinámico expuesto hay dos relaciones técnicas que son usadas para optimizar el uso de insumos:

$$Q_i = Q_i(X, U, t) \quad \text{y} \quad X'_i = f(X, U, t)$$

Estas condiciones sirven para encontrar la optimalidad en las decisiones actuales teniendo en cuenta los efectos de arrastre que los nutrientes aplicados hoy tienen en otros periodos.

En conclusión: la combinación óptima de insumos i y j será aquella para la cual la Tasa Marginal de sustitución intertemporal es igual a la razón de los valores marginales netos de ambos insumos.

CONSIDERACIONES

La siembra directa y la fertilidad dinámica del suelo

La naturaleza dinámica de la contribución del sistema de siembra directa a la fertilidad del suelo, constituye una aplicación interesante del modelo visto anteriormente.

La incorporación del paquete tecnológico de la siembra directa (SD), al modelo se hizo en función de lo que aporta. (Lattanzi, 1998)

- Disminuye la pérdida de suelo por erosión.
- Disminuye la pérdida de nutrientes y de humedad.
- Mejora la fertilidad de las tierras agrícolas.

La función objetivo del empresario en (3) podría reescribirse introduciendo el componente SD

$$J(X_0) = \text{MAX}_{Q, U} \int_0^T e^{-\delta t} [P_1 Q_1(X, U, t) - K_1 U - C_1 Z_1 + P_2 Q_2(X, U, t)] dt \quad (17)$$

sujeto a (2) y una restricción adicional sobre el aumento de fertilidad debido al componente SD (x_j)

$$(18) \quad x'_j = f_j(x, u, t)$$

La condición (18) representa ese cambio en la fertilidad por la incorporación del componente SD.

En (17) Q_2 es el rendimiento del cultivo con SD. P_2 estaría representando el precio de venta de ese cereal que incluye el costo evitado (avoided costs) (Pearce y Turner, 1990) por la degradación del suelo. $P_2 Q_2$ representa el ingreso del productor en la siembra directa.

Según el cultivo que se trate se pueden calcular las pérdidas asociadas que deberán ponderarse para darle valor a P_2 . El INTA publica algunas mermas productivas relacionadas con el grado de erosión: para maíz las mermas están entre 80-120 kg/ha de grano por centímetro de suelo erosionado, entre un 10% al 50% del rendimiento según el grado de erosión.

Para trigo se habla de 40 kg de grano por cm de suelo o entre el 13% al 33% dependiendo de la erosión. Una estimación similar se hizo para soja con los siguientes resultados: entre 35 a 42 kg/ha o entre el 13% al 17%. Estas cifras confirman el comportamiento observado en estos tres cultivos que ubican al maíz como

el más sensible a degradación, en menor medida el trigo y por último la soja que aparece como más inelástica a las variaciones ambientales.

Un criterio para fijar P_2 puede ser el que sigue:

- 1) Considerar algún grado de erosión entre leve, moderado y grave para un modelo de estudio.
- 2) Asignar un porcentaje de merma en el rendimiento del 30%, 60% ó 100% del total de mermas observadas para cada cultivo según el grado de erosión correspondiente.
- 3) Valorar esa pérdida de acuerdo con el precio del producto, eligiendo alguna opción para el mismo entre el precio histórico, el precio actual o corriente, o el precio esperado a futuro. Esta alternativa tiene sentido en tanto que en la valoración individual que hace el productor sobre la importancia de mantener la fertilidad del suelo, se le otorgue mayor peso a las pérdidas sufridas o a los ingresos futuros. Dependiendo esto también de las expectativas individuales de rentabilidad esperada.

Este precio elegido al multiplicarse por los rendimientos promedios para cada cultivo que el mismo empresario ha tenido, o por los promedios zonales, conforman el valor de la pérdida por degradación.

4) Al final del horizonte de planeamiento T , de haberse continuado con el sistema tradicional se podría calcular la pérdida de ingresos acumulada. Ese valor se actualiza a una cierta tasa de descuento y se calcula una alícuota anual. Asumiendo que a partir de que se incorpora la SD se detiene el proceso de erosión, esa alícuota se transforma en pérdida evitada y por lo tanto en parte del ingreso del sistema, que sumado al precio del cereal constituye el valor representado por P_2 (Longo, 1997).

$J[x(t)]$ representa el valor del sistema con Siembra directa al final del horizonte de planeamiento T . Las condiciones de 1º orden para elegir insumos teniendo en cuenta este componente están dadas por:

$$(19) H_{u1} = e^{-\delta t} [P_1 Q_{1u1} - K_1 + P_2 Q_{2u1}] + \sum_{i=1}^3 \phi_i f^i_{u1} = 0$$

$$(20) H_{u2} = e^{-\delta t} [P_1 Q_{1u2} - K_2 + P_2 Q_{2u2}] + \sum_{i=1}^3 \phi_i f^i_{u2} = 0$$

$$(21) (22) \phi_i^* = e^{-\delta t} [P_1 Q_{1xi} + P_2 Q_{2xi}] + \sum_{i=1}^3 \phi_i f^i_{xi} \quad i=1,2$$

$$H_{xi} = -\phi_i^*$$

$$(23) H_{x3} = \phi_3^* = e^{-\delta t} [P_1 Q_{1x3} + P_2 Q_{2x3}] + \sum_{i=1}^3 \phi_i f^i_{x3}$$

$$(24) H \phi_i = f_i(X, U, t) \quad i=1,2,3$$

$$(25) \phi_i(T) = \frac{\delta J[X(T)]}{\delta x_i(T)} \quad i=1,2,3$$

$P_1 Q_{1u1} + P_2 Q_{2u1}$: es el valor del Producto marginal de los cereales y el output del sistema de Siembra Directa debido al incremento en la disponibilidad de materia orgánica. Si Q_2 es el producto de la SD, y por el mismo proceso parte de la cobertura vegetal queda en la tierra, entonces habrá aportes al suelo que serán capturados por u_3 en $t+1$. Ese aporte u_3 tiene un costo K_3 que representa el costo de implementación de la siembra directa (inversiones en equipo, capacitación, gastos y menores rendimientos en los primeros

años) hasta la estabilización del sistema. Este período bien puede ser T (horizonte de planeamiento). A partir de $T+1$ el sistema ya no sería castigado con los costos K_3 .

Luego habrá una condición más de 1º orden para el abono usado en la producción de cereales:

$$(26) \quad H_{u3} = e^{-\delta t} [P_1 Q_{1u3} - K_3 + P_2 Q_{2u3}] + \sum_{i=1}^3 \phi_i f_{u3}^i = 0$$

Esta condición captura los beneficios dinámicos de la fertilidad del suelo por el aporte de la SD. El Costo marginal descontado, del uso del sistema $e^{-\delta t} K_3$, debería igualarse en cualquier momento t con el beneficio marginal del uso del sistema $e^{-\delta t} (P_1 Q_{1u3} + P_2 Q_{2u3})$ más el valor acumulado de fertilidad del suelo $\sum \phi_i f_{u3}^i$.

Reescribiendo (26)

$$e^{-\delta t} [P_1 Q_{1u3} + P_2 Q_{2u3}] + \sum_{i=1}^3 \phi_i f_{u3}^i = e^{-\delta t} K_3 \quad (27)$$

Si el productor quiere maximizar los retornos de la tierra sin preocuparse de la fertilidad futura del suelo, no considerará la SD como una opción de manejo para la mejora del suelo, al menos en el corto plazo. De todos modos para la sociedad en su conjunto la siembra directa es beneficiosa a corto y a largo plazo.

Comparar la tasa de sustitución de nutrientes orgánicos y químicos con la participación de la SD, puede llevar a establecer relaciones de combinación óptima entre ambos en un contexto dinámico. Esto quedaría manifestado en la siguiente expresión:

$$(28) \quad \frac{P_1 Q_{1u1} + P_2 Q_{2u2} - K_1}{P_1 Q_{1u2} + P_2 Q_{2u2} - K_2} = \frac{\sum_{i=1}^3 \phi_i f_{u1}^i}{\sum_{i=1}^3 \phi_i f_{u2}^i}$$

El lado derecho de (28) puede ser la Tasa Marginal de sustitución entre abono orgánico verde y fertilizantes químicos en la producción de cereal considerando la SD.

CONCLUSIONES

Si el valor agregado por la SD al output del sistema es en conjunto mayor que el costo de los inputs insumidos tal beneficio será captado por el sistema de dos modos diferentes:

El costo de oportunidad del suelo es mayor en el período siguiente por la mejora en su fertilidad. Consecuentemente se registrará un aumento en el valor de la tierra.

La productividad marginal del uso de los fertilizantes (orgánicos y químicos) es mayor en $t+1$, con lo que se reduce en el tiempo el costo del manejo de la fertilidad del terreno.

Esta conclusión refuerza el concepto que si bien los procesos y los insumos no son totalmente sustituibles, las tecnologías de proceso (v.g. la Siembra directa) "deben ser intensificadas para optimizar la aplicación de tecnologías de insumos (v.g. los fertilizantes) resguardando al mismo tiempo efectos negativos sobre el ambiente y los Recursos Naturales" (Viglizzo, Op. Cit., 1994). El uso de labranzas conservacionistas (especialmente la Siembra Directa) en los suelos pampeanos produce un apreciable enriquecimiento en fracciones lábiles del nitrógeno que pueden estar disponibles para cultivos futuros (Alvarez *et al*, 1998).

El uso de un modelo como el que se acaba de presentar puede ser de gran utilidad para valorar económicamente tanto el deterioro de los agroecosistemas en el tiempo, como el impacto de cualquier incorporación tecnológica, ya que se parte de la premisa que el productor desea maximizar el valor de la tierra. Como ya se dijo esta depende del estado de fertilidad en el que se halle al final del horizonte.

Mantener la fertilidad implica tomar decisiones en cada período sobre la combinación de uso de insumos (abonos) que aportan a ese estado. La incorporación de una práctica conservacionista, no sólo tendrá impacto sobre el estado de fertilidad sino que alterará las cantidades de los abonos aplicados. La valoración económica de esa incorporación deberá hacerse considerando además de la maximización del valor de la tierra, la relación dinámica entre los ingresos y los costos del manejo de la fertilidad del terreno.

La limitación más importante que tiene la aplicación de este modelo es que requiere de datos que permitan conformar el vector X de estado de fertilidad como la función de cambio de estado x' , haciéndose necesario conocer los niveles de fósforo, nitrógeno, materia orgánica y otros nutrientes que determinan el estado de fertilidad del suelo en cada período, y que a su vez son afectados por las elecciones que se hagan en los insumos.

Aquí cabe destacar que existen estudios con resultados valiosos que permiten inferir las consecuencias que en plazos relativamente prolongados, se producen en el recurso natural suelo debido al uso del mismo. Se determinó el efecto que sobre las propiedades físicas: humedad equivalente, densidad aparente y estabilidad estructural ejercen variables tales como: secuencias de cultivos, sistemas de labranza y fertilización nitrogenada. De su comparación con un suelo virgen, se determinan las asociaciones entre estas alteraciones y el contenido de carbono orgánico total de los suelos. (Arrigo, 1989). Pero no se cuenta con una base de datos suficientes para una misma zona, acerca de la dinámica de los nutrientes en relación con el manejo productivo del suelo, de modo tal de configurar las matrices que dominan el modelo.

La utilidad de contar con un modelo real que contenga datos empíricos sobre el estado y el comportamiento de todas estas variables intervinientes, es de gran utilidad para las decisiones privadas. En cuanto a su utilización en las decisiones públicas puede resultar un valioso instrumento para implementar políticas de uso y conservación del suelo a nivel regional, que requieran una fundamentación económica: control de erosión, difusión de prácticas conservacionistas, y uso y manejo de fertilizantes, entre otras. Estas razones parecen ser suficientes para justificar la recopilación de datos a campo que permitan la utilización de modelos de control óptimo no sólo para satisfacer el objetivo planteado en este trabajo, sino otros que surjan en relación con la dinámica de algunas variables.

APENDICE

Para cualquier función

- Q_t = Función de producción de cereales
- X = Vector de indicadores de fertilidad
- x_1 = Materia orgánica x_2 = Nitrógeno
- u_1 = Fertilizantes orgánicos u_2 = Fertilizantes químicos
- πt = Beneficios del sistema con SD
- K_t = Vector de precios de insumos
- C_t = Vector costos de insumos no fertilizantes
- Z_t = Vector de otros insumos
- $x' = dx_t/dt$ tasa de crecimiento de las variables en el vector X .
- f_t = Función de la ecuación del cambio
- $J(X_0)$ = Valor presente del flujo de beneficios
- δ = Tasa de descuento del productor
- $J(X_T)$ = Valor del beneficio en T
- X_T = Vector x en T
- ϕ = Variable auxiliar asociada con el estado de x_t
- K_3 = Costo de la SD

BIBLIOGRAFÍA

- ALVAREZ, R., C. ALVAREZ, P. DANIEL, V. RICHTER and L. BLOTTA (1998) Nitrogen distribution in soil density fractions and its relation to nitrogen mineralization under different tillage systems. *Aust. J. Soil Res.*, 1998, 36, 247-56.
- ARRIGO, N., R. PALMA, M. CONTI y D. COSENTINO 1990: Incidencia de las secuencias de cultivos, sistemas de labranza y de fertilización sobre algunas propiedades físicas y su relación sobre el Carbono. *Revista de la Facultad de Agronomía* Tomo 11 N°2-3. Pags. 143-150
- BABU S., A. HALLAM and B. RAJASEKARAN (1995) Dynamic Modelling of agroforestry and soil fertility interactions: implications for multi-disciplinary research policy. *Agricultural Economics* 13 (1995) 125-135.
- BARBERIS, L.A., A. NERVI, A. SFEIR, P. DANIEL, S. URRICARRIET, M. VÁZQUEZ y D. ZOURAKIS 1983: Análisis de la Respuesta del trigo a la fertilización nitrogenada en la Pampa arenosa y su predicción. *Revista de la Facultad de Agronomía*. Tomo 4 N°3.
- BERARDO A., F. GRATTON y R. RIZALLI (1993) Evaluación del efecto residual de fósforo en un argiudol típico bajo dos secuencias de cultivos. *Actas del XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mendoza. Octubre de 1993.
- CHIANG ALPHA (1992) Elements of Dynamic Optimization. Mc Graw Hill. USA
- GLEDINING M. and D. POWLSON (1991) The effect of long-term applications of organic nitrogen fertilizer on soil organic nitrogen. In W.S. Wilson (ed) p.326-338. *Advances in soil organic matter research: the impact on agriculture and environment. Spec. Publ. 90* Royal Society of Chemistry. London.
- LATTANZI, A. La Siembra Directa y la agricultura sustentable. (p 29-34) In Panigatti, J., Marelli, H., Busciazzi, D. Gil, R. (ed) (1998) Siembra Directa. Hemisferio Sur- INTA.
- LONGO, L. (1997) Evaluación Económica de la sustitución entre ambiente y Tecnología. Tesis de Postgrado. Ms.Sc.en Economía Agraria. Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires-INTA.
- PEARCE D., R. TURNER, (1990) Economics of natural resources and the environment. Ed. Harvester Wheatsheaf
- VIGLIZZO E., (1994) El INTA frente al desafío del desarrollo Agropecuario Sustentable. En Desarrollo Agropecuario Sustentable. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC)